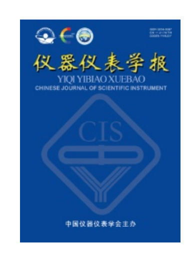


仪器仪表学报
Chinese Journal of Scientific Instrument
ISSN 0254-3087,CN 11-2179/TH

《仪器仪表学报》网络首发论文

题目： 视觉引导机器人磨削系统工具坐标系标定方法研究
作者： 宋安玉，邓惠铭，杨梁，周中朝，张烈山
DOI： 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413241
收稿日期： 2024-09-03
网络首发日期： 2024-12-26
引用格式： 宋安玉，邓惠铭，杨梁，周中朝，张烈山．视觉引导机器人磨削系统工具坐标系标定方法研究[J/OL]．仪器仪表学报．
https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2413241





网络首发时间：2024-12-26 09:42:31　　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2179.TH.20241224.1735.006

第45卷　第12期　　仪　器　仪　表　学　报　　Vol. 45 No. 12
2024年12月　　Chinese Journal of Scientific Instrument　　Dec. 2024

DOI：10.19650/j.cnki.cjsi.J2413241

视觉引导机器人磨削系统工具坐标系标定方法研究*

宋安玉[1]，邓惠铭[1]，杨　梁[1]，周中朝[2]，张烈山[1]

（1. 浙江理工大学信息科学与工程学院　杭州　310018；2. 山东一唯自动化有限公司　枣庄　277499）

摘　要：视觉引导机器人磨削系统中的工具-机器人末端坐标系位姿关系的标定问题是决定磨削精度的关键。为了解决机器人工具坐标系标定时标定精度不高、效率较低的问题，提出一种基于试块磨削轮廓偏差校正的标定方案。该方案首先使用组合优化算法进行高精度手眼标定，其次使用线结构光传感器扫描磨削前后的标准试块建立理想与实际工具-机器人基坐标系位姿关系，并以此推出偏差矩阵，偏差矩阵用来补偿工具-机器人末端坐标系位姿关系，即最终实现工具坐标系标定。通过仿真和工具坐标系标定实验，结果表明工具坐标系的位置偏差达到0.25 mm以内，坐标系三轴的姿态偏差均小于0.01°；通过焊管焊缝磨削实验，得出磨削后的焊缝余高在0.2 mm以内，可满足大多数工业要求。

关键词：线结构光传感器；手眼标定；工具坐标系标定；焊缝磨削

中图分类号：TP24　TH165+.2　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：460.5030

Research on calibration methods for tool coordinate systems in vision-guided robotic grinding systems

Song Anyu[1], Deng Huiming[1], Yang Liang[1], Zhou Zhongchao[2], Zhang Lieshan[1]

(*1. School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Shandong Yiwei Automation Co., Ltd, Zaozhuang 277499, China*)

Abstract: The calibration of the tool-robot end coordinate system position relationship in the vision-guided robot grinding system is the key to determine the grinding accuracy. In order to solve the problem of poor calibration accuracy and low efficiency in the calibration of the robot tool coordinate system, this paper proposes a calibration scheme based on the grinding contour deviation correction of the test block. The proposed method begins with high-precision hand-eye calibration using a combined optimization algorithm. Next, a line-structured optical sensor scans the standard test block before and after grinding to establish the ideal and actual positional relationship between the tool and the robot base coordinate system. A deviation matrix is introduced to compensate for discrepancies in the tool-to-robot end coordinate system, effectively achieving tool coordinate system calibration. Simulation and experimental results show that the position deviation of the tool coordinate system is within 0.25 mm, and the attitude deviation of the three axes of the coordinate system is less than 0.01°. Furthermore, pipe seam grinding experiments reveal that the residual height of the weld seam after grinding is within 0.2 mm, meeting most industrial requirements.

Keywords: line-structured light sensor; hand-eye calibration; tool coordinate system calibration; weld seam grinding.

0　引　言

在工业生产中，大型焊管被广泛应用到城市地下管廊以及石油和天然气的输送。因工艺问题，焊管焊接生成过程中会产生焊缝，在防腐、对接处理之前需对焊管的焊缝进行磨削处理，尤其对焊管的管端焊缝进行磨削是一个非常重要的步骤。对于大型石油管道的管端焊缝磨削精度，通常要求焊缝余高在±0.3 mm以内，而达到此精度也可满足其他多数磨削应用需求[1]。

收稿日期：2024-09-03　　Received Date：2024-09-03

*基金项目：国家自然科学基金项目（62271449）、国家级大学生创新创业训练计划项目（202310338046）资助

目前,大多数焊管制造企业通过人工示教方式来实现机器人磨削,该方法规划了固定路径,导致机器人只能在固定位置示教磨削[2]。然而,由于焊缝位置存在差异,示教磨削难以确保一致的加工质量。为了解决这一问题,给工业机器人配备视觉传感器,使其能够感知外界信息,通过获取工件图像信息来磨削不同型号的工件,从而提高了适应性[3-4]。

在视觉传感器与机器人融合的过程中,有一些关键性问题影响到了最终的加工精度。其中,视觉传感器与机器人的标定问题[5]、末端工具与机器人的标定问题[6]、机器人运动学标定问题[7-9]一直都是学者探讨研究的热点问题。

使用视觉传感器为线结构光传感器[10-11],目前关于线结构光传感器与机器人之间的标定,常规的方法是借助外部有规则的标定物体,如球形[12],阶梯形标定物[13],圆孔形[14],M 形[15]等,通过变换机器人姿态,对这些特殊标定物上的标记点扫描,以标记点在空间中的位置是固定的为约束条件,建立型如 $\boldsymbol{AX}=\boldsymbol{XB}$ 的方程组[16]。从而求解出手眼矩阵。还有一种目前比较热门的研究方法是从三维重建[17]的角度出发,通过对提前设计的标准件进行多姿态扫描,将扫描到的点云与设计的标准件 CAD 模型进行点云配准。并在配准的过程中将求解手眼标定矩阵。

常见的针对末端工具的标定方法是在机器人的末端加装探针,通过姿态的变化获取求解工具坐标系位姿参数的方程[18]。如四点标定法[19]、六点标定法[20]等。然而,这种标定方法多用于工作方式为点接触的工具,对于机器人末端的磨削工具,其工作接触方式为面接触,相应的标定方法较少,由于加工误差和安装误差的存在,使用 SolidWorks 模型上的工具参数是不准确的,因此需要对磨削工具的位置进行精细标定[21]。

针对工具型磨削机器人提出一种视觉引导机器人磨削系统工具坐标系标定方法,机器人末端安装磨削工具与线结构光传感器,在使用组合优化算法进行高精度手眼标定后,扫描磨削前后标准试块建立理想与实际的工具-机器人基坐标系相对位姿关系,计算两者的偏差矩阵,以该矩阵来补偿工具坐标系位姿,最终实现手、眼、工具坐标系的融合。仿真和实验证明了此方法的有效性。

1 视觉引导机器人的磨削系统构成

视觉引导机器人的磨削系统模型如图 1 所示,主要由机器人本体、线结构光传感器、磨削工具、工作台和精加工试块组成。本文将先后对线结构光传感器与机器人的相对位置关系、磨削工具坐标系与机器人之间的相对位置关系进行标定。

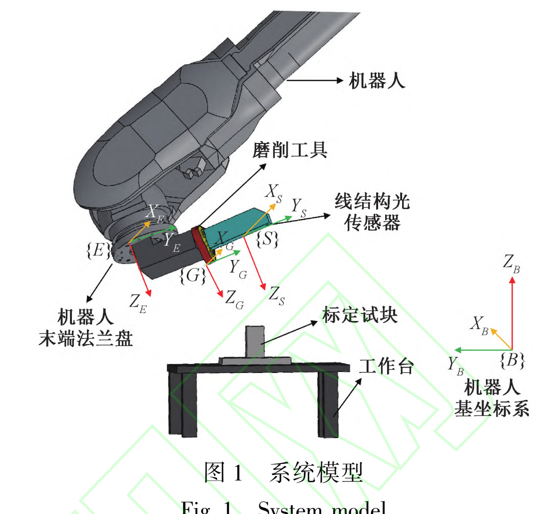


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

在上图中,$\{B\}$ 为机器人基坐标系,$\{E\}$ 为机器人末端法兰盘坐标系,$\{S\}$ 为线结构光传感器坐标系,$\{G\}$ 为磨削工具坐标系。线结构光传感器下的点 ${}^{S}\boldsymbol{p}$ 与机器人基坐标系下的点 ${}^{B}\boldsymbol{p}$ 之间的转换公式、磨削工具坐标系下的点 ${}^{G}\boldsymbol{p}$ 与机器人基坐标系下的点 ${}^{B}\boldsymbol{p}$ 之间的转换公式分别为:

$$\begin{cases} {}^{B}\boldsymbol{p} = {}^{B}_{E}\boldsymbol{T} \times {}^{E}_{S}\boldsymbol{T} \times {}^{S}p \\ {}^{B}\boldsymbol{p} = {}^{B}_{E}\boldsymbol{T} \times {}^{E}_{G}\boldsymbol{T} \times {}^{G}p \end{cases} \tag{1}$$

其中,${}^{S}_{E}\boldsymbol{T}$ 为线结构光传感器相对于机器人末端法兰盘的手眼转换矩阵,为未知量。${}^{B}_{E}\boldsymbol{T}$ 为机器人末端法兰盘坐标系与机器人基坐标之间的转换矩阵,可通过机器人的控制器将其读取出来,为已知量。${}^{E}_{G}\boldsymbol{T}$ 为磨削工具坐标系与机器人末端法兰盘坐标系之间的转换矩阵,为未知量,本文对视觉引导的机器人磨削系统标定的目的就是为了求解 ${}^{S}_{E}\boldsymbol{T}$ 与 ${}^{E}_{G}\boldsymbol{T}$。

2 手眼标定原理

本文使用的线结构光传感器搭载在机器人末端法兰盘上,为“眼在手上”的手眼标定系统[22]。经典的求解方法是使用标准球作为标定物,所使用的标准球直径为 20 mm,使用机械臂带动线结构光传感器对固定的标准球进行变姿态扫描,每次扫描都可获得截面圆的点云数据,进而对点云数据使用圆拟合算法拟合出截面圆的圆心在线结构光传感器下的坐标(x_s, z_s)和半径 r,并记录每次扫描时截面圆与球心在线结构光传感器下的位置关系来判断 Y 轴的正负,根据式(2)即可求出球心的坐标(x_c, y_c, z_c)。

$$\begin{cases} x_c = x_s \\ y_c = \pm\sqrt{10^2 - r^2} \\ z_c = z_s \end{cases} \tag{2}$$

经过多次扫描会得到标准球的球心点在线结构光传感器下的坐标点集 $\{\boldsymbol{P} = {}^{S}\boldsymbol{P}_{i} \mid i = 1,2,3,\cdots,n\}$，由于标准球在基坐标系下的位置是固定的,经过 n 次变姿态扫描后,就会获得 n 个如式(1)的方程。经过数学变换后,可得到如式(3)的方程组。

$$\begin{cases} {}_{E}^{B}\boldsymbol{T}_{1} \times {}_{S}^{E}\boldsymbol{T} \times {}^{S}\boldsymbol{p}_{1} = {}_{E}^{B}\boldsymbol{T}_{2} \times {}_{S}^{E}\boldsymbol{T} \times {}^{S}\boldsymbol{p}_{2} \\ {}_{E}^{B}\boldsymbol{T}_{2} \times {}_{S}^{E}\boldsymbol{T} \times {}^{S}\boldsymbol{p}_{2} = {}_{E}^{B}\boldsymbol{T}_{3} \times {}_{S}^{E}\boldsymbol{T} \times {}^{S}\boldsymbol{p}_{3} \\ \vdots \\ {}_{E}^{B}\boldsymbol{T}_{n-1} \times {}_{S}^{E}\boldsymbol{T} \times {}^{S}\boldsymbol{p}_{n-1} = {}_{E}^{B}\boldsymbol{T}_{n} \times {}_{S}^{E}\boldsymbol{T} \times {}^{S}\boldsymbol{p}_{n} \end{cases} \tag{3}$$

上式可以改写为:

$$\begin{pmatrix} {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{1} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \boldsymbol{r}_{1} & \boldsymbol{r}_{2} & \boldsymbol{r}_{3} & \boldsymbol{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times (x_{s}^{1} \quad 0 \quad z_{s}^{1} \quad 1)^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{i} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{i} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \boldsymbol{r}_{1} & \boldsymbol{r}_{2} & \boldsymbol{r}_{3} & \boldsymbol{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times (x_{s}^{i} \quad 0 \quad z_{s}^{i} \quad 1)^{\mathrm{T}},$$
$$i = 1,2,\cdots,n \tag{4}$$

其中,${}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{i}$ 为${}_{E}^{B}\boldsymbol{T}$ 的旋转矩阵,为 3×3 矩阵;${}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{i}$ 与 $\boldsymbol{t}$ 分别为${}_{E}^{B}\boldsymbol{T}$ 与${}_{S}^{E}\boldsymbol{T}$ 的平移向量;r_1、r_2、r_3 为手眼矩阵${}_{S}^{E}\boldsymbol{T}$ 中 X 轴、Y 轴、Z 轴的旋转分量。

上式中的每个方程的左式减去右式,化简可得:

$$\begin{bmatrix} {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1}x_{S}^{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{2}x_{S}^{2} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1}z_{S}^{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{2}z_{S}^{2} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{2} \\ {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1}x_{S}^{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{3}x_{S}^{3} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1}z_{S}^{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{3}z_{S}^{3} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ {}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}\boldsymbol{R}_{1}x_{S}^{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{i}x_{S}^{i} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1}z_{S}^{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{i}z_{S}^{i} & {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{1} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{R}_{i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{1} \\ \boldsymbol{r}_{3} \\ \boldsymbol{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{2} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{1} \\ {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{3} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{1} \\ \vdots \\ {}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}\boldsymbol{t}_{i} - {}_{E}^{B}\boldsymbol{t}_{1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

可以得到型如 $\boldsymbol{AX} = \boldsymbol{b}$ 的方程组。然后使用最小二乘法即可求解出手眼标定矩阵,最小二乘法的求解公式为:

$$\boldsymbol{X} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b} \tag{6}$$

求解出 r_1、r_2 和 t 之后,根据坐标系右手定则,可以得出:

$$\boldsymbol{r}_{2} = \boldsymbol{r}_{1} \times \boldsymbol{r}_{3} \tag{7}$$

求解出手眼矩阵 ${}_{S}^{E}\boldsymbol{T}$ 后,在不考虑正交约束的情况下,通过最小二乘法求解线性方程得到的数值解${}_{S}^{E}\boldsymbol{R}$,与单位正交旋转矩阵存在一定误差。这个误差可以通过对旋转矩阵进行奇异值分解${}_{S}^{E}\boldsymbol{R} = \boldsymbol{U\Sigma V}^{\mathrm{T}}$ 来纠正。将奇异值矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 替换为单位矩阵,从而得到${}_{S}^{E}\boldsymbol{R} = \boldsymbol{UV}^{\mathrm{T}}$。如果行列式为 1,那么${}_{S}^{E}\boldsymbol{R}$ 就是单位正交的版本。如果行列式不为 1,则需将单位矩阵的最后一列调整为 -1,以确保导出单位正交矩阵。

求解出手眼矩阵后,由于测量误差与机器人运动学误差的存在,求解的手眼矩阵精度还不能达到精加工的要求,仍需进一步校准来提高精度。

本文所使用的优化算法借鉴于文献[23],对标准球进行不同姿态的扫描,得到测量数据后将所有测量数据随机选择组合,计算多个变换矩阵,从而得到相应的基坐标系下的轮廓数据集。由于所有轮廓数据都来自固定的标准球,因此将轮廓数据进行球拟合后,可得到拟合误差最小的最优手眼变换矩阵。采用上述文献中提出的球体损失函数进行评价拟合误差,如式(8)所示:

$$\mathrm{Sphere_Loss} = K_{1} \times \frac{\mathrm{Spherical_}MSE}{\mathrm{Ref_}MSE} + K_{2} \times \frac{1 - R\mathrm{_Coefficient}}{1 - R\mathrm{_Thresholad}} \tag{8}$$

其中,$Ref_{\mathrm{Spherical_}MSE}$ 表示可接受球面均方误差(MSE)的上限,$Ref_{\mathrm{Spherical_}MSE}$ 为球面均方误差归一化后表示的比例权重,R_Coefficient 为半径系数,R_Threshold 为半径偏差阈值,K_2 为半径系数归一化后表示的比例权重。半径系数为测量球体的拟合半径与标准球体的半径的接近程度,其求解公式为:

$$R\mathrm{_Coefficient} = \frac{(R - |\mathrm{Fitting_}R - R|)}{R} \tag{9}$$

其中,R 为标准球体半径的实际值, Fitting_R 为拟合半径。

3　磨削工具坐标系标定

磨削工具坐标系标定是为求解工具坐标系与机器人末端坐标系位姿关系。针对面接触式打磨工具设计一种圆柱形磨削工具,首先,初始化磨削工具矩阵 ${}_{GR}^{E}\boldsymbol{T}$,使用线结构光传感器扫描标准试块表面建立预设磨削工具坐标系$\{GM\}$ 位姿${}_{GM}^{E}\boldsymbol{T}$,其次以当前的${}_{GR}^{E}\boldsymbol{T}$ 操作机器人磨削标准试块后,令其末端坐标系$\{G\}$ 在示教器中与$\{GM\}$ 重合,再次扫描试块,得到实际工具坐标系$\{GR\}$ 位姿${}_{GR}^{E}\boldsymbol{T}$,计算${}_{GM}^{\mathrm{E}}\boldsymbol{T}$ 与${}_{GR}^{E}\boldsymbol{T}$ 的偏差矩阵 $\boldsymbol{T}$,使用偏差矩阵更新当前的${}_{GR}^{E}\boldsymbol{T}$。

3.1　磨削工具建模

常见的工具型磨削机器人的磨削工具通常为圆柱形,本文以此特点设计了以 3 个圆柱形轮子和砂带组成的磨削工具进行研究,如图 2 所示。

图 2 中的驱动轮是磨削工具的主要动力来源,负责传递动力到砂带,使其沿着设定的路径移动;张紧轮的作用是在磨削过程中维持一定的张力保证砂带不会在高速运动中滑落;打磨轮是磨削工具的工作部分,砂带在接触轮上形成工作面。

图 3 为打磨轮模型示意图,可将磨削工具坐标系$\{G\}$建立在打磨轮上。以打磨轮母线上的中点作为磨削工具坐标系的原点,以圆柱的轴线向量方向作为 X 轴方

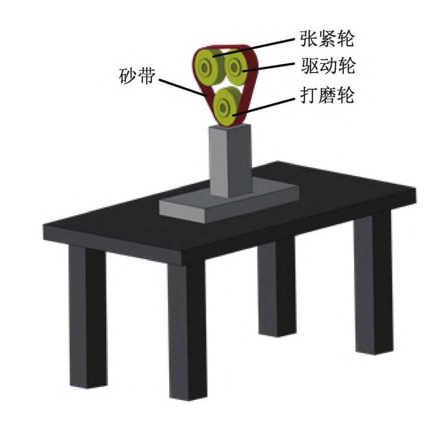


图2 磨削工具模型

Fig. 2 Schematic diagram of grinding tool model

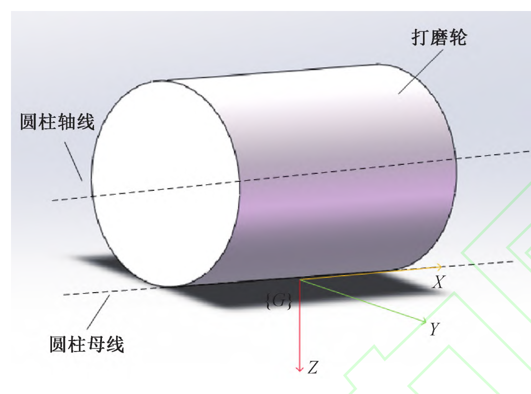


图3 打磨轮模型

Fig. 3 Schematic diagram of grinding wheel model

向,其 Z 轴方向为与圆柱的中心轴线正交。Y 轴可根据右手定则得到。

建立磨削工具模型后,磨削工具的标定的问题可解释为求解工具坐标系 $\{G\}$ 与机器人末端法兰盘坐标系 $\{E\}$ 之间的相对关系。

3.2 磨削工具标定步骤

本文对磨削工具标定时,首先建立一个参考点的坐标系位姿 $\{GM\}$,接着控制机器人带动磨削工具在理想状态下到达该参考点,并利用磨削精加工试块的方式重建出当前实际的位姿 $\{GR\}$。通过比较 $\{GR\}$ 与 $\{GM\}$ 之间的相对位姿关系,即可将磨削工具坐标系的姿态进行校正。

具体的标定步骤如下:

1)构建磨削工具设计位姿

定义磨削工具-机器人基坐标系设计位姿矩阵为 ${}_{GM}^{B}\boldsymbol{T}=[\boldsymbol{r}_1,\boldsymbol{r}_2,\boldsymbol{r}_3,{}_{GM}^{B}\boldsymbol{t};0,0,0,1]$,其中 $\boldsymbol{r}_1$、$\boldsymbol{r}_2$、$\boldsymbol{r}_3$ 分别为 ${}_{GM}^{B}\boldsymbol{T}$ 中旋转矩阵的 X、Y、Z 轴方向向量,${}_{GM}^{B}\boldsymbol{t}=(x_{cm},y_{cm},z_{cm})^{\mathrm{T}}$ 为 ${}_{GM}^{B}\boldsymbol{T}$ 的平移向量,$\boldsymbol{r}_1$、$\boldsymbol{r}_2$、$\boldsymbol{r}_3$、${}_{GM}^{B}\boldsymbol{t}$ 均为 3×1 的列向量。

定义空间中参考点时,可将精加工试块的中心点作为磨削的起始点。尽可能多的获取打磨轮的轮廓信息可更好的拟合圆柱面,建立的磨削工具坐标系也会更加精确,然而考虑到磨削工具的磨削深度范围限制,其一般最大磨削深度为5 mm。因此需在合适的磨削深度内完成标定。

在手眼标定完成之后,使用线结构光传感器扫描标准试块上表面生成点云,将点云信息转换到机器人基坐标系下,如图4所示通过变姿态扫描将每条边的位置信息扫描出来,从而找到4条边的位置信息和平面的点云信息,可将平面点云拟合出一个平面 α:

$$ax+by+cz+d=0 \tag{10}$$

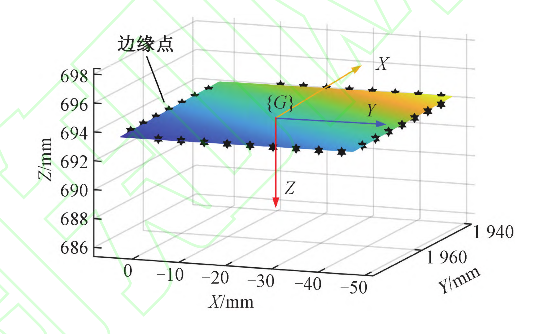


图4 试块上平面及边缘点

Fig. 4 The upper plane and edge points of the test block

将式(10)变换为如下形式:

$$z=-\frac{a}{c}x-\frac{b}{c}y-\frac{d}{c} \tag{11}$$

令 $a_0=-\dfrac{a}{c}$;$a_1=-\dfrac{b}{c}$;$a_2=-\dfrac{d}{c}$,式(11)可变为:

$$z=a_0x+a_1y+a_2 \tag{12}$$

此时可建立最小二乘方程 $\boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{b}$,其中,

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}x_1 & y_1 & 1\\ x_2 & y_2 & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ x_n & y_n & 1\end{pmatrix},\boldsymbol{x}=\begin{pmatrix}a_0\\ a_1\\ a_2\end{pmatrix},\boldsymbol{b}=\begin{pmatrix}z_1\\ z_2\\ \cdots\\ z_n\end{pmatrix},(n\geqslant 3),$$

$(x_1,y_1,z_1),(x_2,y_2,z_2),\cdots,(x_n,y_n,z_n)$ 为点云坐标值。此时由最小二乘法可以得到 $\boldsymbol{x}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b}$,最终得到 a,b,c,d 的值,并可得平面法向量 (a,b,c)。

建立平面方程后,首先定义工具坐标系 $\{GM\}$ 的原点坐标 (x_{cm},y_{cm},z_{cm}),定义方法如下:通过点云数据处理找出4条边上的边缘点信息,x_{cm} 的值为平面接近平行基坐标系 Y 轴方向的两条边的 X 轴坐标的平均值,y_{cm} 的值为平面接近平行基坐标系 X 轴方向的两条边的 Y 轴坐标的平均值,将 (x_{cm},y_{cm}) 带入式(10),可以得出 Z 轴方向的坐标值 z_{cm}。其次定义工具坐标系 $\{G\}$ 的 X、Y、Z 轴方向向量 $\boldsymbol{r}_1$、$\boldsymbol{r}_2$、$\boldsymbol{r}_3$,Z 轴方向向量 $\boldsymbol{r}_3$ 为平面法向量 (a,b,c),将4条边的边缘点投影到拟合平面后,找到

与基坐标系的 X 轴接近平行的一条边作为 X 轴方向向量 $\boldsymbol{r}_1$,Y 轴方向向量 $\boldsymbol{r}_2=\boldsymbol{r}_1\times\boldsymbol{r}_3$。此时完成建立 0 mm 磨削深度的磨削工具设计位姿 ${}^{B}_{GM}\boldsymbol{T}$,建立磨削后 ${}^{B}_{GM}\boldsymbol{T}$, 则需将原点坐标($x_{cm}$, y_{cm}, z_{cm})向平面的法向量方向平移对应的打磨深度。

2)磨削工具实际空间位姿建模

为重建出磨削工具当前实际的位姿,本文使用磨削工具对精加工试块磨削后,通过线结构光传感器扫描磨削后的轮廓痕迹重建出磨削工具坐标系。如图 5 所示为磨削工具在精加工试块上表面磨削后,实际磨削形状与理想形状的示意图,虚线为实际磨削出的形状。实体为理想情况下磨削工具应磨削出的形状。

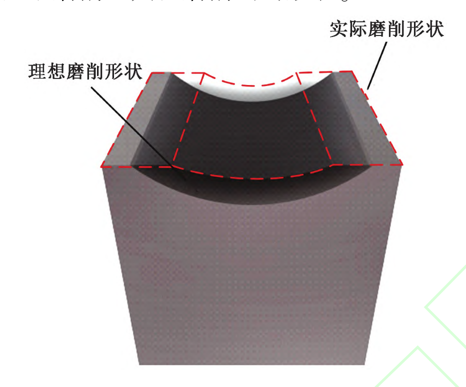


图 5　磨削后实际与理想轮廓

Fig. 5　Actual and ideal contour drawings after grinding

为采集磨削后的试块轮廓点云,重新采集试块上表面轮廓,主要包括平面的点云、接触面点云。采集后的点云数据如图 6 所示。

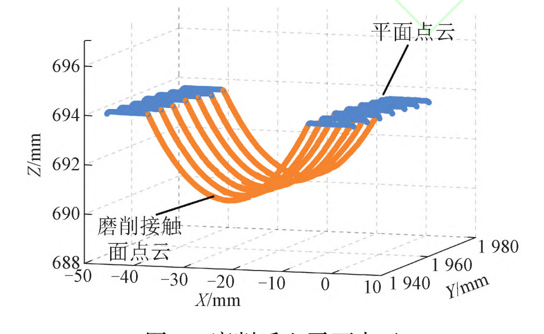


图 6　磨削后上平面点云

Fig. 6　Upper plane point cloud after grinding

可根据磨削后的磨削面轮廓信息,使用圆柱拟合算法重建出打磨轮模型,从而得到当前磨削工具坐标系{GR}的位姿 ${}^{B}_{GR}\boldsymbol{T}$。

定义工具-机器人基坐标系实际位姿矩阵为 ${}^{B}_{GR}\boldsymbol{T}$ = [$\boldsymbol{q}_1$,$\boldsymbol{q}_2$,$\boldsymbol{q}_3$,${}^{B}_{GR}\boldsymbol{t}$;0,0,0,1],其中 $\boldsymbol{q}_1$、$\boldsymbol{q}_2$、$\boldsymbol{q}_3$ 分别为 ${}^{B}_{GR}\boldsymbol{T}$ 中旋转矩阵的 X、Y、Z 轴方向向量,${}^{B}_{GR}\boldsymbol{t}=(x_{cr},y_{cr},z_{cr})^{\mathrm{T}}$ 为 ${}^{B}_{GM}\boldsymbol{T}$ 的平移向量,$\boldsymbol{q}_1$、$\boldsymbol{q}_2$、$\boldsymbol{q}_3$、、${}^{B}_{GR}\boldsymbol{t}$ 均为 3×1 的列向量。

定义工具坐标系{GR}的 X、Y、Z 轴方向向量 $\boldsymbol{q}_1$、$\boldsymbol{q}_2$、$\boldsymbol{q}_3$。计算采集点云到标准试块拟合平面的距离,对距离最大值的点使用最小二乘拟合构成直线方程。

$$\frac{x-x_0}{m}=\frac{y-y_0}{n}=\frac{z-z_0}{p} \tag{13}$$

其中,(m,n,p)为直线方程的方向向量,(x_0, y_0, z_0)为直线上的一个点。(m,n,p)为 X 轴方向向量 q_1,该直线也为圆柱的母线,计算圆柱拟合中心点投影在圆柱母线上的点,该点即为{GR}的原点坐标(x_{cr},y_{cr},z_{cr}),根据上述两点计算方向向量,即为 Z 轴方向向量 $\boldsymbol{q}_3$。Y 轴方向向量 $\boldsymbol{q}_2=\boldsymbol{q}_1\times\boldsymbol{q}_3$。

3)校正磨削工具坐标系位姿

此时的{GR},{GM}都是在机器人基坐标系下的位置和姿态描述,{GR}可由一个转换矩阵 T 转换到{GM}的位姿,可得式(14)。

$$\begin{cases}{}^{B}_{GM}\boldsymbol{T}={}^{B}_{GR}\boldsymbol{T}\times\boldsymbol{T}\\{}^{B}_{GR}\boldsymbol{T}={}^{B}_{E}\boldsymbol{T}\times{}^{E}_{GR}\boldsymbol{T}\\{}^{B}_{GM}\boldsymbol{T}={}^{B}_{E}\boldsymbol{T}\times{}^{E}_{GM}\boldsymbol{T}\end{cases} \tag{14}$$

根据式(14)可推出:

$$\boldsymbol{T}={}^{E}_{GR}\boldsymbol{T}^{-1}\times{}^{E}_{GM}\boldsymbol{T} \tag{15}$$

可将矩阵 T 补偿到磨削工具坐标系,即可获取当前实际的 ${}^{E}_{GR}\boldsymbol{T}$ 为:

$${}^{E}_{GR}\boldsymbol{T}={}^{E}_{GM}\boldsymbol{T}\times\boldsymbol{T}^{-1} \tag{16}$$

通过上述步骤,可完成对磨削工具坐标系的标定,以确保在实际应用中,机器人融和视觉传感器准确地携带磨削工具到达预设位置,这个过程不仅涉及到精确的空间定位,还包括了对工具姿态的精确控制,确保了整个磨削过程的精度。

4　仿真分析

为验证本文方法的可行性和准确性,将主要验证在具有测量误差的情况下,磨削工具模型建立的精确程度。由上文介绍的标定步骤可知对磨削工具建模的精度好坏取决于圆柱拟合的精度。如图 7 所示,使用到的打磨轮半径为 40 mm,而打磨轮在标准试块上只能留下 2~5 mm 深的磨削痕迹,且线结构光传感器具有测量误差。因此在线结构光传感器的测量误差干扰下,能否使用部分圆柱面的部分点云拟合出整个圆柱为本实验验证重点。

线结构传感器扫描磨削试块后的上平面磨削面轮廓,为 10 条曲线。线结构光传感器的测量精度为 ±0.02 mm,由上一章节的手眼标定实验结果可知,在手眼矩阵标定好后,扫描的点云与拟合平面的误差最大 0.2 mm。为了模拟实际操作中可能遇到的误差,在点云

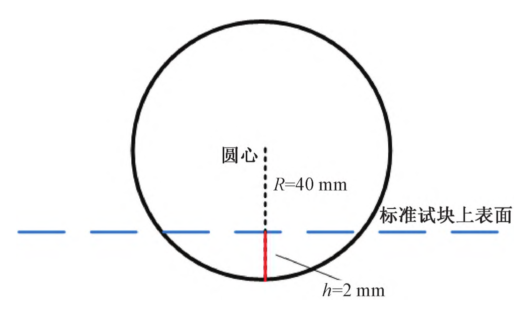


图 7 打磨轮磨削范围

Fig. 7 Schematic diagram of grinding range of grinding wheel

数据的 X、Y、Z 轴位置上加入 0~0.3 mm 的随机误差,这种做不仅考虑了线结构光传感器的测量误差,也考虑了手眼标定的不确定性,从而为分析圆柱拟合算法的鲁棒性提供了测试环境。如图 8 所示本文共随机生成了 4 种不同位姿的试块位置。

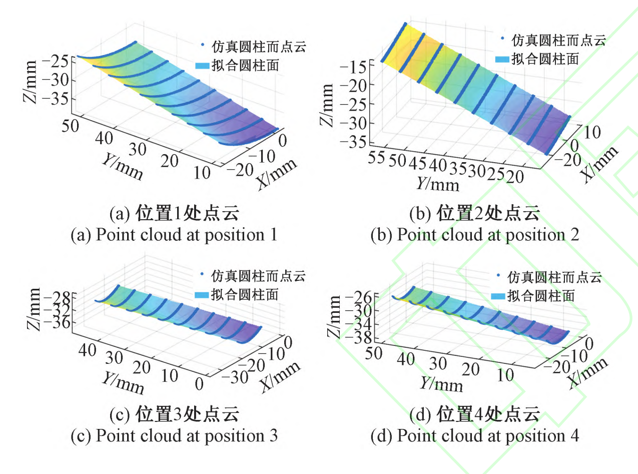


图 8 试块磨削面仿真点云

Fig. 8 Simulated point cloud of test block grinding surface

本文采用基于最小二乘法的迭代算法拟合打磨轮圆柱面[24]。将线结构光传感器扫描后的第 1 条点云曲线进行圆拟合,求出其圆心、法向量、半径后作为圆柱轴线上的一点(x_0, y_0, z_0),圆柱轴线方向 $\boldsymbol{V}(v_x, v_y, v_z)$ 和圆柱半径 R 的初值。再将点云的每个点(x,y,z)到圆柱表面之间的差值 d 作为目标函数。其公式为:

$$d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - \boldsymbol{V}\cdot(\Delta x,\Delta y,\Delta z)} - R \tag{17}$$

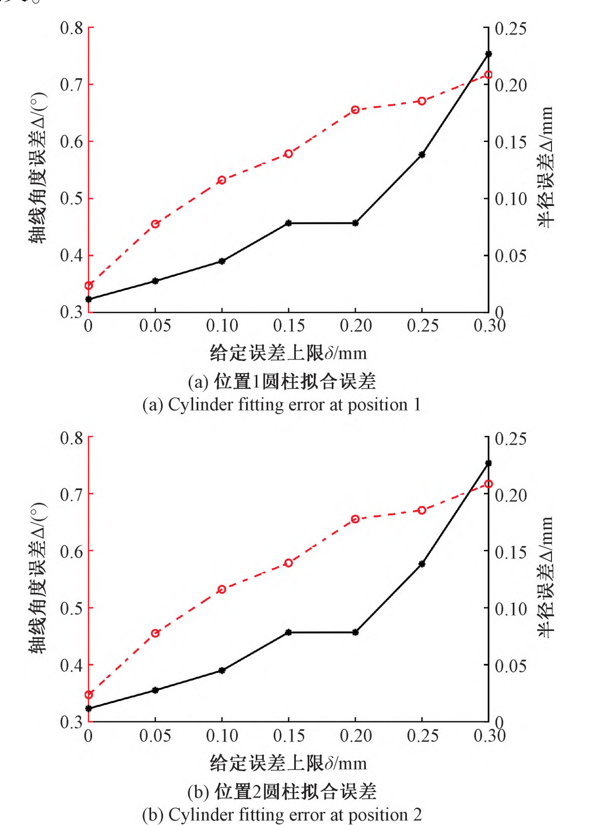
式中:Δx, Δy, Δz 分别为圆柱面上的点到圆柱轴线上一点(x_0, y_0, z_0)距离的三轴分量。由式(17)可知该函数共有 7 个参数。设共有 n 个点,求其 7 个参数的方向导数设为 $\boldsymbol{J}$ 矩阵。计算这 n 个点与圆柱面的距离集合 $\{d_1 \quad d_2 \quad \cdots \quad d_n\}^{\mathrm{T}}$ 作为 $\boldsymbol{b}$ 矩阵。可建立以下方程组:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial x_0} & \frac{\partial d_1}{\partial y_0} & \frac{\partial d_1}{\partial z_0} & \frac{\partial d_1}{\partial v_x} & \frac{\partial d_1}{\partial v_y} & \frac{\partial d_1}{\partial v_z} & \frac{\partial d_1}{\partial R} \\ \frac{\partial d_2}{\partial x_0} & \frac{\partial d_2}{\partial y_0} & \frac{\partial d_2}{\partial z_0} & \frac{\partial d_2}{\partial v_x} & \frac{\partial d_2}{\partial v_y} & \frac{\partial d_2}{\partial v_z} & \frac{\partial d_2}{\partial R} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial d_n}{\partial x_0} & \frac{\partial d_n}{\partial y_0} & \frac{\partial d_n}{\partial z_0} & \frac{\partial d_n}{\partial v_x} & \frac{\partial d_n}{\partial v_y} & \frac{\partial d_n}{\partial v_z} & \frac{\partial d_n}{\partial R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \tag{18}$$

使用最小二乘法求解即可得到当前的圆柱轴线方向(v_x, v_y, v_z)、圆柱轴线上一点的坐标(x_0, y_0, z_0)与圆柱半径 R。当迭代的次数到达预先设定值或相邻两次迭代的优化值的差值小于阈值时迭代停止。

在给点云坐标的 X 轴、Y 轴、Z 轴坐标分别添加上限为 0.3 mm 的随机误差后,其拟合圆柱的半径大小误差与轴线的角度偏差如图 9 所示,其中图 9(a)、(b)虚线为轴线角度差,图 9(c)、(d)虚线为圆柱轴线误差,实线均为半径误差。

由图 9 可知,即使在点云坐标中引入了一定的随机误差,使用本文的拟合圆柱算法在 4 个随机位置下的圆柱轴线误差在 0.8°以下,圆柱的拟合半径误差在 0.25 mm 以下。本文提出的圆柱拟合算法能在不同位置准确地拟合出圆柱轴线和圆柱的半径。这验证了标定算法的鲁棒性和精确性,对于本文研究的目的具有重要意义。



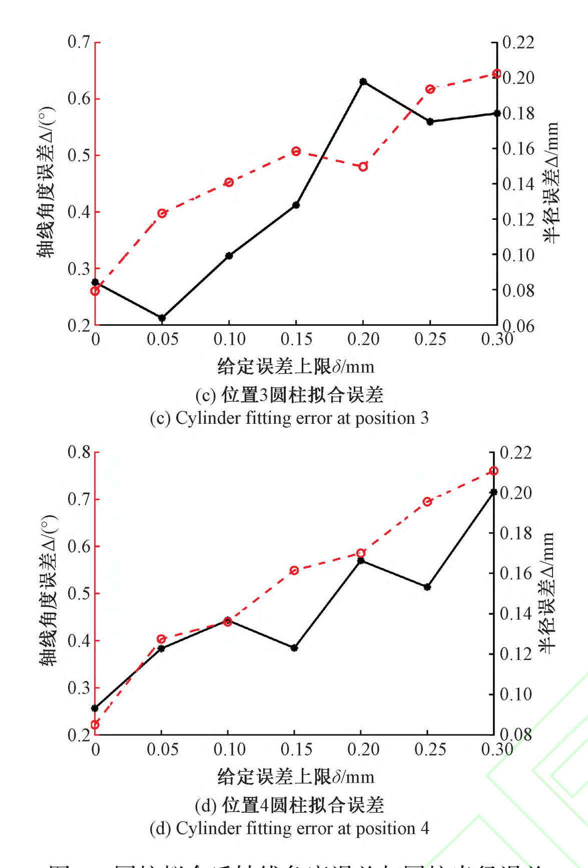


图 9　圆柱拟合后轴线角度误差与圆柱半径误差

Fig. 9　Axis angle error and cylinder radius error after cylindrical fitting

5　实　　验

5.1　手眼标定试验

通过使用 ABB 公司的 IRB/6700 型号机器人带动基恩士 LJ-X8080 线结构光传感器对标准球扫描进行实验,线结构光传感器的测量误差为 0.02 mm。如图 10 所示为实验过程图。

使用 4 组测量数组,每组测量数据中有 10 个标准球轮廓点,以及对应的机器人位姿,从 10 个数据中选取 K 个数据点组成矩阵方程,当 K 由 5 变成 10 时,可组成 $\sum_{K=5}^{10} C_{10}^{K}$ 个手眼变换方程,对于 $\sum_{K=5}^{10} C_{10}^{K}$ 个数据集,每个数据集中包含 K 个标准球轮廓,对每个数据集进行球拟合,并进行计算其球损失,由此可以得到符合最小球损失的手眼变换矩阵。

表 1 为第 2 节所提计算球损失公式的部分参数设置。

表 2 为实验得出组合优化前后的球损失数值对比。

组合优化前后的球损失数值对比如表 2 所示。由表 2 可知,每组进行组合优化后得出的球损失值都要比优化前小的多。

为将效果可视化,如图 11 所示,分别使用优化前后的手眼矩阵结果对其中一组扫描点云数据反求到基坐标下,观察点云与拟合球面的距离以及分层情况。

由图 11 可知,优化前标准球轮廓局部存在分层现象,优化后的轮廓之间的交点可以很好地重合,并且分层现象明显减少,进一步验证求解出手眼矩阵的精确性。

综上所述,手眼矩阵经过标定试验后可知为:



图 10　机器人扫描标准球进行手眼标定试验

Fig. 10　Robot scans the standard ball for hand-eye calibration test

表 1　球损失公式部分参数设置

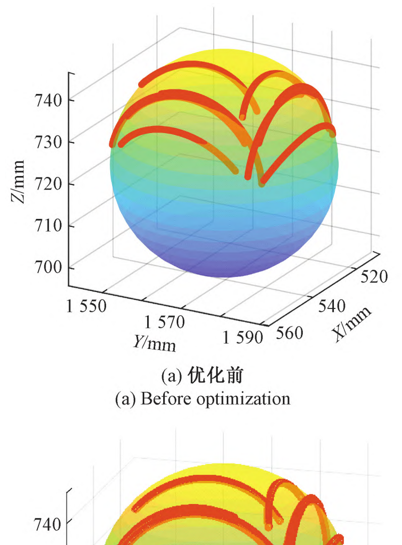
Table 1　Ball loss formula part parameter setting

参数	值
K_1	0.7
K_2	0.3
$Ref_{Spherical_MSE}$	0.02
R_Threshold	0.995

表 2　组合优化前后的球损失数值对比

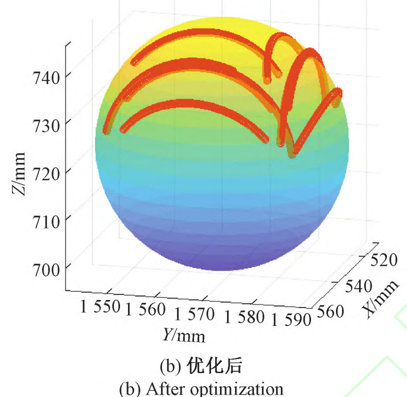
Table 2　Comparison of ball loss values before and after combinatorial optimization

序号	优化前	优化后
1	6.068 8	1.058
2	3.13	0.172 1
3	4.949 3	0.229 7
4	7.835 1	0.994 8
平均	5.495 8	0.614



(a) 优化前

(a) Before optimization



(b) 优化后

(b) After optimization

图 11　优化前后标准球轮廓

Fig. 11　Optimized front and rear standard ball contours

$$
{}_{S}^{E}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} -0.0354 & 0.9954 & -0.0100 & -638.2880 \\ -1.0015 & -0.0041 & 0.0099 & 1.2784 \\ -0.0055 & -0.0107 & 1.0052 & 342.8632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{19}
$$

5.2　磨削工具标定实验

为验证本文磨削工具标定算法的有效性,如图 12 所示本文搭建了如下的机器人磨削工具的标定系统,精加工试块,其上表面为(40 mm×50 mm)的矩形平面。

磨削工具相对于机器人末端法兰盘的初始值由 SolidWorks 模型可知为:

$$
{}_{GM}^{E}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0088 & -0.0011 & -487.6363 \\ -0.0088 & 0.9995 & -0.0285 & 0.0000 \\ 0.0008 & 0.0285 & 0.9995 & 349.4430 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \tag{20}
$$

由 5.1 节手眼标定实验可知,线结构光传感器与机器人之间的手眼矩阵经过标定后结果为:



图 12　磨削工具标定实验

Fig. 12　Grinding tool calibration experiment

$$
{}_{S}^{E}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} -0.0354 & 0.9954 & -0.0100 & -638.2880 \\ -1.0015 & -0.0041 & 0.0099 & 1.2784 \\ -0.0055 & -0.0107 & 1.0052 & 342.8632 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{21}
$$

对精加工试块扫描后,设定磨削深度为 2 mm,建立理想磨削工具的坐标系应到达空间中的位姿{GM}。操作机器人使用当前的磨削工具姿态 ${}_{GM}^{E}\boldsymbol{T}$ 输入到机器人示教器中对试块进行磨削,令其在示教器中到达磨削深度{GM}的位置。而由于磨削工具存在装配误差,实际磨削工具坐标系到达{GR}位置处。扫描磨削后的标准试块,将曲面信息拟合为圆柱后即可建立磨削工具坐标系{GR},如图 13 所示,可发现其与理想的位置{GM}位置不同,因此可将二者之间的转换矩阵 T 求解出来。从而下一步求解出实际的 ${}_{G}^{E}\boldsymbol{T}$。

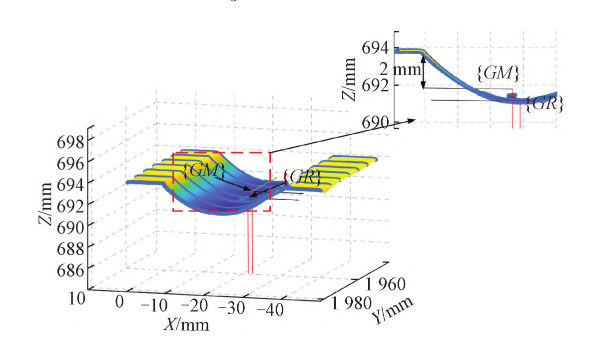


图 13　标定前理想与当前坐标系位置

Fig. 13　Schematic diagram of ideal and current coordinate system positions before calibration

根据{GM}与{GR}之间的相对位置关系可求出旋转矩阵 T,对当前的 ${}_{GM}^{E}\boldsymbol{T}$ 进行补偿可求出当前的 ${}_{G}^{E}\boldsymbol{T}$。以当

前的${}^{E}_{G}\boldsymbol{T}$再次对试块进行磨削,设置磨削深度为 3.3 mm,观察其理想坐标系{*GM*}与当前坐标系{*GR*}的位置关系,如图 14 所示,验证其标定效果。

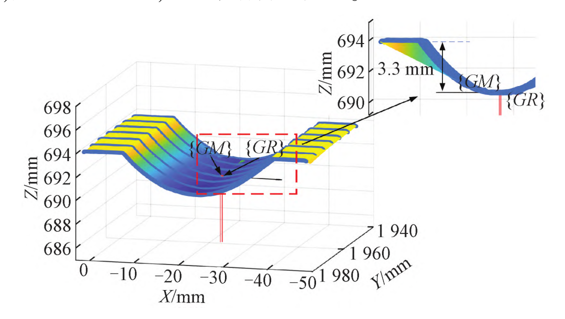


图 14　标定后理想与实际坐标系位置

Fig. 14　Schematic diagram of ideal and current coordinate system positions after calibration

由图 14 可知,经过标定后再次磨削,可求得理想与实际坐标系之间已接近重合,转换矩阵 ***T*** 为:

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}1.0000 & 0 & 0 & -0.1376\\ 0 & 0.9999 & 0.0031 & -0.2269\\ 0 & -0.0031 & 0.9999 & -0.0198\\ 0 & 0 & 0 & 1.0000\end{bmatrix}$$

如表 3 所示将上式旋转矩阵转换为欧拉角与位置的形式可直观看出位姿的 6 个参数的误差[25]。

表 3　磨削工具标定后位姿差

Table 3　Posture difference of grinding tools after calibration

X 轴角度差/(°)	*Y* 轴角度差/(°)	*Z* 轴角度差/(°)	*X* 轴位置差/mm	*Y* 轴位置差/mm	*Z* 轴位置差/mm
−0.003 1	−0.000 8	−0.000 2	−0.137 6	−0.226 9	−0.019 8

实际工业要求工具标定精度要求一般为角度误差在±0.01°以内,位置误差在±0.3 mm 以内,由上表可知 3 个轴的角度误差都小于 0.01°,3 个轴的最大误差为 0.226 9 mm。满足精细磨削的加工精度要求。

5.3　磨削焊管焊缝实验

为验证本文方法的标定精度以及实际的工业应用效果,设计了焊管焊缝的磨削实验。使用线结构光传感器对焊缝位置进行扫描,生成焊缝在基坐标系下的位置后,控制机器人到达生成的位置点进行焊缝磨削。如图 15 所示为焊缝的磨削实验图,焊管外径为 610 mm,焊缝宽度约为 25 mm,使用标定好的手眼矩阵和磨削工具坐标系结果对焊缝进行磨削。

磨削完成后,使用线结构光传感器再次对焊缝进行扫描,其效果展示如图 16 所示。



图 15　焊缝磨削实验

Fig. 15　Experimental diagram of welding seam grinding

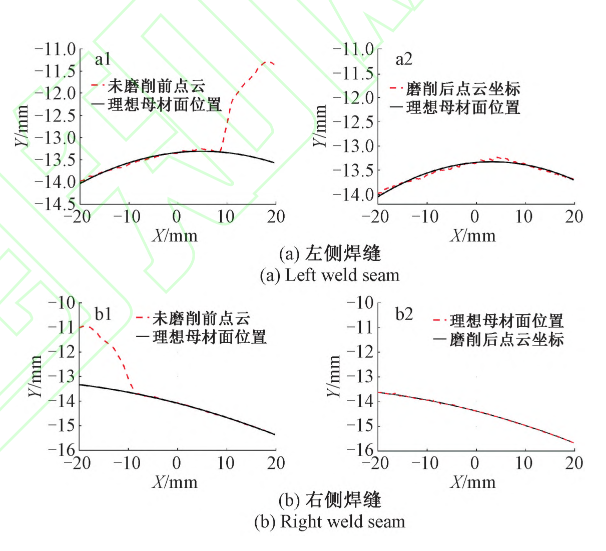
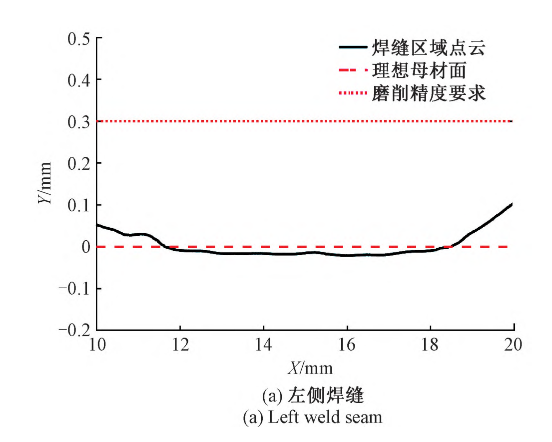


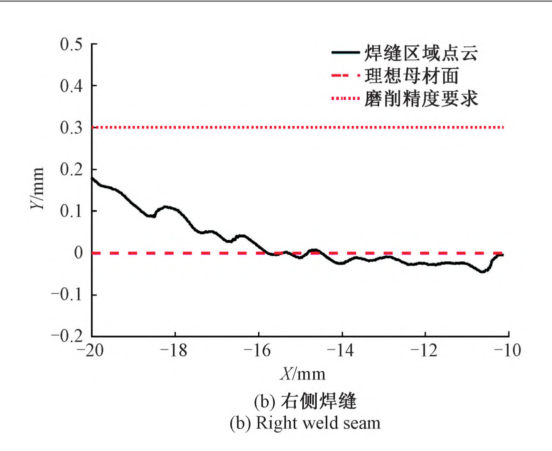
图 16　磨削前后焊缝余高对比

Fig. 16　Comparison diagram of weld seam reinforcement before and after grinding

由图 16 可知,经过磨削后,焊缝区域与钢管理想母材面基本吻合,整体轮廓比较平滑。计算磨削后的焊缝区域点云与理想母材面之间的偏差,结果如图 17 所示。

从图 17 中可以看出,左右两边的焊缝区域轮廓与理想母材表面残差都控制在−0.1~0.2 mm 之间,满足精细





(b) 右侧焊缝
(b) Right weld seam

图 17 磨削前后焊缝余高

Fig. 17 Continued weld seam excess height before and after grinding

磨削的加工精度要求，机器人磨削焊缝质量合格，进而验证本文标定算法的有效性和精确性。

6 结　论

本文提出了一种高精度的机器人工具坐标系位姿标定新方法。利用所提方法对标定精度进行了验证，仿真实验表明，引入一定随机误差，使用本文的拟合圆柱算法的圆柱轴线误差在 0.8°以下，圆柱的拟合半径误差在 0.25 mm 以下；工具坐标系的位置偏差优于±0.25 mm，坐标系三轴的姿态偏差均小于 0.01°；焊管焊缝磨削后，焊缝余高在± 0.2 mm 以内，可满足大多数工业需求。

本文提出的工具坐标系标定方法为视觉引导机器人的高精度磨削提供了基础，这种利用外部标准件进行工具位姿建模、补偿的方案不仅可用于磨削工具标定，也为其他工业应用提供了新思路。

参考文献

[1] 葛吉民，邓朝晖，王水仙，等. 基于点云的机器人焊缝自动化磨削系统与方法[J]. 中国机械工程，2024，35(7)：1253-1262，1268.
GE J M, DENG CH H, WANG SH X, et al. Robot weld seam automatic grinding system and method based on point cloud[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(7)：1253-1262，1268.

[2] 周军红，高如国，栾公峰，等. 智能化焊接机器人在建筑钢结构行业中的应用[J]. 焊接技术，2020，49(2)：73-75.
ZHOU J H, GAO R G, LUAN G F, et al. Application of intelligent welding robots in the construction steel structure industry[J]. Welding Technology, 2020, 49(2):73-75.

[3] 沈微微，姜晓燕，张兵等. 机器人抓取视觉传感目标精确定位方法[J]. 传感技术学报，2023，36(5)：763-768.
SHEN W W, JIANG X Y, ZHANG B, et al. Precise positioning method of robot grasping visual sensing target[J]. Journal of Sensor Technology, 2023, 36(5)：763-768.

[4] 严海堂，钱牧云，魏新园，等. 机器人打磨系统力控补偿优化算法研究[J]. 仪器仪表学报，2024，45(4)：272-281.
YAN H T, QIAN M Y, WEI X Y, et al. Research on optimization algorithm for force control compensation of robot grinding system[J]. Journal of Instrumentation, 2024, 45(4):272-281.

[5] HORAUD R, DORNAIKA F. Hand-eye calibration[J]. The international journal of robotics research, 1995, 14(3):195-210.

[6] 罗豪龙，王力，向奉卓，等. 基于最小二乘的工具坐标系标定方法[J]. 电子测量技术，2020，43(2)：6-9.
LUO H L, WANG L, XIANG F ZH, et al. Tool coordinate system calibration method based on least squares[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(2):6-9.

[7] 邹方星，范百兴，陈哲. 基于运动学标定和空间插值的机器人定位误差补偿[J]. 电子测量技术，2024，47(4):51-57.
ZOU F X, FAN B X, CHEN ZH. Robot positioning error compensation based on kinematic calibration and spatial interpolation[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4):51-57.

[8] 郭万金，李锦辉，郝钦磊，等. 基于病态参数分离的机器人运动学标定测量构型优化[J]. 仪器仪表学报，2024，45(2)：299-314.
GUO W J, LI J H, HAO Q L, et al. Optimization of measurement configuration for robot kinematic calibration based on ill-conditioned parameter separation[J]. Journal of Instrumentation, 2024, 45(2)：299-314.

[9] 温秀兰，宋爱国，冯月贵，等. 基于最优位姿集的机

器人标定及不确定度评定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 276-283.

WEN X L, SONG AI G, FENG Y G, et al. Robot calibration and uncertainty evaluation based on optimal pose set[J]. Journal of Instrumentation, 2022,43(9): 276-283.

[10] 于龙龙, 李艳文, 栾英宝, 等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 124-131.

YU L L, LI Y W, LUAN Y B, et al. Calibration of line structured light based on two-dimensional planar target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(6):124-131.

[11] 李云梦, 关丽敏, 王会峰, 等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 66-73.

LI Y M, GUAN L M, WANG H F, et al. 3D measurement system of rotational scanning structured light and its calibration[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 66-73.

[12] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.

YANG SH R, YIN SH B, REN Y J, et al. Improvement of calibration method for robot flexible visual measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3239-3246.

[13] 孙炜, 舒帅, 李汶霖, 等. 基于阶梯形标定物的线激光传感器手眼标定算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 83-92.

SUN W, SHU SH, LI W L, et al. Hand-eye calibration algorithm of line laser sensor based on step-shaped calibration target [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(2): 83-92.

[14] 邓惠铭, 潘知康, 林行威, 等. 基于圆孔标定板的视觉机器人手眼标定方法[J]. 机械与电子, 2024, 42(2): 61-68.

DENG H M, PAN ZH K, LIN X W, et al. Vision-based robot hand-eye calibration method using circular hole calibration board[J]. Machinery & Electronics, 2024, 42(2):61-68.

[15] 邰承岳, 谌业清, 李昊冉, 等. 基于 M 型标准块的视觉引导机器人系统手眼标定方法研究[J]. 计算机测量与控制,2024, 32(1): 133-141.

TAI CH Y, CHEN Y Q, LI H R, et al. Research on hand-eye calibration method for vision-guided robot system based on M-type standard block[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(1): 133-141.

[16] WU J, LIU M, ZHU Y, et al. Globally optimal symbolic hand-eye calibration[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 26(3):1369-1379.

[17] LI M Y, DU ZH J, MA X X, et al. A robot hand-eye calibration method of line laser sensor based on 3D reconstruction [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71:102136.

[18] LIN C J, WANG H CH, WANG CH CH. Automatic calibration of tool center point for six degree of freedom robot[C]. Actuators, 2023, 12(3):107.

[19] 贾铜, 毕德学, 宋韦辰, 等. 基于视觉引导的机器人抓取系统手眼标定方法[J]. 食品与机械, 2024, 40(7):63-67,110.

JIA T, BI D X, SONG W CH, et al. Hand-eye calibration method for vision-guided robot grasping system[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 63-67, 110.

[20] 陈琳, 李权文, 付钰, 等. 同轴度法标定相贯线工件坐标系[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(7): 119-122,126.

CHEN L, LI Q W, FU Y, et al. Coaxiality method for calibrating workpiece coordinate system of intersecting line [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(7):119-122,126.

[21] LI D W, YANG J X, ZHAO H, et al. Contact force plan and control of robotic grinding towards ensuring contour accuracy of curved surfaces[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 227:107449.

[22] JIANG J F, LUO X, LUO Q SH, et al. An overview of hand-eye calibration [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(1): 77-97.

[23] AN Y, WANG X C, ZHU X X, et al. Application of combinatorial optimization algorithm in industrial robot hand eye calibration [J]. Measurement, 2022, 202: 111815.

[24] NURUNNABI A, SADAHIRO Y, LINDENBERGH R, et al. Robust cylinder fitting in laser scanning point cloud data[J]. Measurement, 2019, 138:632-651.

[25] KIM S, KIM M. Rotation representations and their conversions[J]. IEEE Access, 2023, 11:6682-6699.

作者简介



宋安玉,2023 年于中原工学院获得学士学位,现为浙江理工大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉测量技术。

E-mail:anyu_s@ 163. com

Song Anyu received his B. Sc. degree from Zhongyuan University of Technology in 2023. Now he is a master degree candidate at Zhejiang Sci-Tech University. His main research direction is machine vision measurement technology.



张烈山(通信作者),2010 年于中国计量大学获得学士学位,2012 年和 2017 年于哈尔滨工业大学获得硕士和博士学位,现任浙江理工大学副教授,主要研究方向为机器人手眼协同、激光多普勒干涉测量技术。

E-mail:zhanglieshan@ zstu. edu. cn

Zhang Lieshan (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from China Jiliang University. He received M. Sc. and Ph. D. degrees in 2012 and 2017 from Harbin Institute of Technology. He is currently an associate professor at the School of Information Science and Technology of Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include robot hand-eye coordination, laser doppler interferometry technology.